

基于 MATLAB 建模的单结太阳能电池的研究

曹 可

(晋能控股电力集团地电柳林分公司, 山西 柳林 033399)

摘 要:通过在 MATLAB/SIMULINK 中对单结太阳能电池进行建模和仿真,发现了变量参数与光伏系统输出之间的关系。可变参数可以是串联电阻、太阳辐射强度和工作环境温度。当其中之一发生变化时,单结太阳能输出电压、输出功率、开路电压和短路电流也会产生不同的幅值变化。仿真结果得到基于不同变量的特性曲线。

关键词:单结太阳能电池;MATLAB;理想电子

中图分类号:TM914

文献标识码:A

文章编号:2095-0748(2021)10-0025-05

引言

单结太阳能电池通常由硅制成,由于光伏效应,太阳能电池将光能转换为电能,产生的电流与太阳辐射成正比,在等效电路图中其 PN 结用二极管表示。p-n 结是由两种半导体材料构成的,一种称为 p 型,另一种称为 n 型。只有一个 p-n 结的太阳能电池称为单结太阳能电池(传统太阳能电池)。掺杂硼的 p 型半导体和 n 型半导体被广泛用于常规单结太阳能电池中,同时也广泛应用于太阳能发电厂,利用其单个 p-n 结的光伏效应来发电^[1]。

本文将通过分析单结太阳能电池等效电路、数学方程和工作原理建立模型,最后对计算和仿真结果进行讨论。

1 等效电路分析

为了更好地了解太阳能电池,首先需要对太阳能电池进行等效电路分析,然后结合其等效电路和所需参数建立等效数学方程模型。太阳能电池最简单的等效电路由二极管和电流源并联组成^[1-3]。从图 1 中,当忽略分流电阻时,理想的太阳能电池方程可表示为:

$$I = I_{ph} - I_d \quad (1)$$

式中: I 是光伏(PV)太阳能电池输出电流; I_{ph} 是光电流; I_d 是二极管的暗电流。

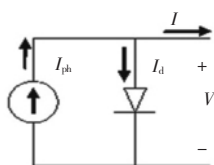


图 1 理想的单结太阳能电池等效电路

事实上,受太阳能电池内部元件的一些影响,如电池串联电阻 R_s 和并联电阻 R_{sh} ,都会影响实验结果,当考虑串联电阻和并联电阻时,新的太阳能电池电路包括二极管、线电阻和光生电流源相互并联,如图 2 所示。根据基尔霍夫定律,太阳能电池输出电流 I 的方程将采用以下形式^[4]:

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (2)$$

I_p 是并联电阻中的分流。

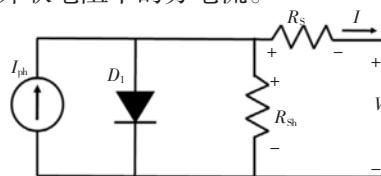


图 2 单结太阳能电池等效电路

由于太阳能电池通过光伏效应产生电流,因此光电流 I_{ph} 仅受太阳辐射和工作温度的影响。根据参考文献,光电流 I_{ph} 的方程可写为:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} [I_{sc,ref} + \mu_{sc} \times (T_c - T_{c,ref})] \quad (3)$$

式中: G 是太阳辐射, W/m^2 ; G_{ref} 为太阳辐射参考参数, W/m^2 ; μ_{sc} 是短路电流的温度系数, $A/^\circ C$; T_c 是实际电池温度, K ; $T_{c,ref}$ 是标准温度条件下的电池温度, K ($STC=25+273=298 K$); $I_{sc,ref}$ 是标准条件温度下的光电流, A 。

对于暗电流 I_d , 可以写成与反向饱和电流 I_0 相关的如下形式:

$$I_d = I_0 \left[e^{\frac{qV}{N_A K T_c}} - 1 \right] \quad (4)$$

式中: V 是二极管出现的电压; N_s 是串联连接的光伏电池的数量; K 是玻尔兹曼常数 $1.381 \times 10^{-23} J/K$; q 是电子电荷常数 $1.602 \times 10^{-19} C$; T_c 是绝对电池温度, K 。

A 是理想因子,它取决于光伏电池技术,可以从下页表 1 中选择,通常被认为是一个常数,实验表明

收稿日期:2021-09-26

作者简介:曹可(1993—),男,毕业于英国纽卡斯尔大学电力专业,硕士,从事变电运行工作。

表 1 二极管理想因子

Technology	A
Si-mono	1.2
Si-poly	1.3
a-Si:H	1.8
a-Si:H tandem	3.3
a-Si:H triple	5
CdTe	1.5
CIS	1.5
AsGa	1.3

它可以在 1 到 1.5 之间进行评估选择。

I_0 为二极管的反向饱和或漏电流,用下式表示:

$$I_0 = I_{0,\text{ref}} \left(\frac{T_c}{T_{c,\text{ref}}} \right)^{\frac{3}{A}} e^{\frac{qE_g}{k} \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_{c,\text{ref}}} \right)} / kA \quad (5)$$

二极管反向饱和电流 I_0 的值取决于太阳能电池二极管理想因子和材料的带隙能量 E_g , 单位为 eV, 带隙能量 E_g 是指价带和导带之间没有电子存在的区域。由于主要用于制造的材料是硅(Si), 带隙能量可以设置为 1.12 eV。并联电阻很大, 所以并联电阻电流很小, 可以忽略不计。

I_d 方程, 热电压 V_T 具有 K 、 T_c 和 q 的关系, 可以通过以下方程计算:

$$\frac{K \times T_c}{q} = V_T \quad (6)$$

$$R_{sh} = \frac{V_{mp,\text{ref}} + I_{mp,\text{ref}} R_s}{I_{sc,\text{ref}} - I_{sc,\text{ref}} \left[\exp \left(\frac{V_{mp,\text{ref}} + R_s I_{mp,\text{ref}} - V_{oc,\text{ref}}}{a} \right) \right] + I_{sc,\text{ref}} \left[\exp \left(\frac{-V_{oc,\text{ref}}}{a} \right) \right] - \left(\frac{P_{\text{max},\text{ex}}}{V_{mp,\text{ref}}} \right)} \quad (13)$$

对于一个可靠的仿真系统, 串联电阻 R_s 和并联电阻 R_{sh} 可由上式计算得到, 在实验环境和 STC(标准温度条件: 温度 = 25°C) 条件下, 最大输出功率 P_{mp} 等于 $P_{\text{max},\text{ex}}$ 。以下等式表示 P_{mp} 和 $P_{\text{max},\text{ex}}$ 之间的关系。

$$I_{mp,\text{ref}} = \frac{P_{mp,\text{ref}}}{V_{mp,\text{ref}}} = \frac{P_{mp,\text{ex}}}{V_{mp,\text{ex}}} = I_{ph,\text{ref}} - I_{0,\text{ref}} \left[\exp \left(\frac{V_{mp,\text{ref}} + R_s I_{mp,\text{ref}}}{a} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mp,\text{ref}} + R_s I_{mp,\text{ref}}}{R_{sh}} \quad (14)$$

开始时, 串联电阻 $R_s = 0$ 。在迭代之后, R_s 的值从 0 增加, 直到匹配最大功率点。然后也可以计算出相应的 R_{sh} , 只有一对值满足这个条件^[5]。

单结太阳能电池的效率基本可以由式 (15) 计算, 如下所示:

$$\eta = \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{in}}} = \frac{U_m I_m}{S_{sc} G_{\text{ref}}} \quad (15)$$

式中: U_m 为光伏系统最大输出电压; I_m 为光伏系统最大输出电流; S_{sc} 是太阳能电池面积; $P_{\text{max}} = P_m$ 是最大功率; P_{in} 是输入功率。

2 仿真

通过以上对光伏太阳能电池的数学方程分析, 可以利用这些方程在 MATLAB/Simulink 中建立数学

$$V_T = 27.5 \text{ mV}, \text{ 在 } 25^\circ\text{C} \text{ 条件下} \quad (7)$$

另一方面, 反向饱和和参考电流 $I_{0,\text{ref}}$ 可以写成如下形式:

$$I_{0,\text{ref}} = I_{sc,\text{ref}} \left[e^{\frac{V_{oc,\text{ref}}}{AV_i}} - 1 \right] \quad (8)$$

$V_{oc,\text{ref}}$ 是基于参考条件的太阳能电池开路电压。

此外, 太阳能电池的开路电压可按式计算:

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right] \quad (9)$$

带有并联电阻的输出电流 I 可写为:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{NAKT_c}} - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (10)$$

将式(3)(4)(5)(8)带入到等式(2)中, 输出电流的总方程表示为下式:

$$I = \frac{G}{G_{\text{ref}}} \left[I_{ph,\text{ref}} + \mu_{sc} \times (T_c - T_{c,\text{ref}}) \right] - I_{sc} \left[e^{\frac{V_{oc,\text{ref}}}{AV_i}} - 1 \right] \times \left(\frac{T_c}{T_{c,\text{ref}}} \right)^{\frac{3}{A}} \times e^{\frac{qE_g}{k} \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_{c,\text{ref}}} \right)} \times \left[e^{\frac{qV}{NAKT_c}} - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (11)$$

因此, 光伏系统的输出电压为:

$$V = IR_L \quad (12)$$

式中: 其中 R_L 为负载电阻, 接在电路外。

模型。基于 ET-P6 36 125 太阳能电池组件的所有参数都可以在表 2 中找到。

表 2 厂商初始参数表

参数名称	数值
规格/(mm·mm)	156 × 156
太阳能电池数量/个	36(串联)
最大功率, P_{max}/W	125
最大功率电压, V_{mp}/V	17.40
最大功率电流, I_{mp}/A	7.18
开路电流, I_{sc}/A	7.80
开路电压, V_{oc}/V	21.75
开路电流 I_{sc} 的温度系数/(%·°C ⁻¹)	0.065
开路电压 V_{oc} 的温度系数/(%·°C ⁻¹)	-0.346
模组规格/(mm·mm·mm)	1 482 × 676 × 34
串联电阻, R_s/Ω	0.55
短路电流温度系数, $\mu_{sc}/(\text{A} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	1.3×10^{-3}
串联光伏电池数量, $N_f/\text{个}$	36

在仿真情况下, 使用斜坡块对输入电压进行仿真, 设置斜率为 1, 开始时间和初始输出均设置为 0。然后总结各部分的模型, 并输入相应的参数。整体仿真模型如下页图 3 所示:

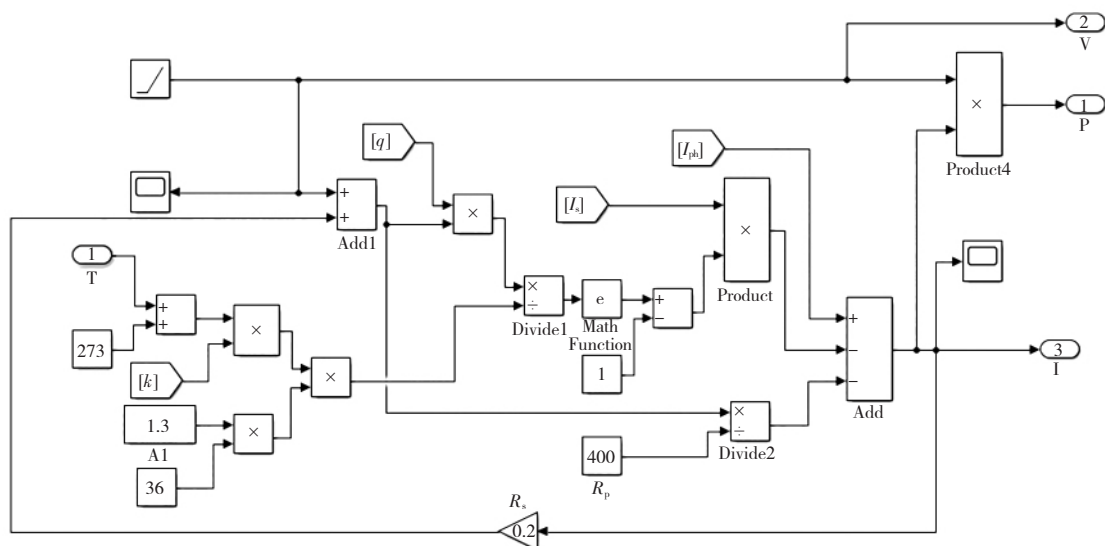


图3 整个光伏系统的整体模拟

3 单结太阳能电池的仿真结果

3.1 太阳辐射量的变化

MATLAB/Simulink 仿真结果可以在本章中呈现,下面的图4到图5清楚地显示了温度为25℃时不同太阳辐射下的V&I和V&P特性曲线。

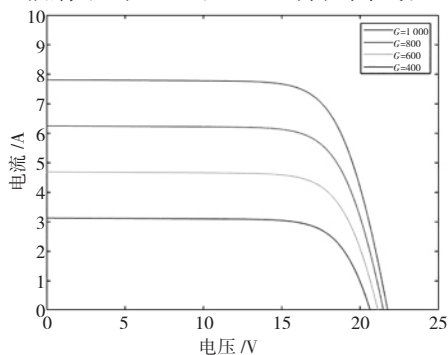


图4 基于变化辐射和固定温度的V&I特性曲线

从图4可以看出,电流随太阳辐射强度的变化而变化,在变化的太阳辐射条件下,开路电压几乎相等。这是因为太阳能电池的短路电流因太阳辐射强度而异,太阳辐射越强,太阳能电池产生的电流越大,而辐射强度的降低会减少太阳能电池电流的产生,说明太阳辐射在很大程度上决定了整个光伏太

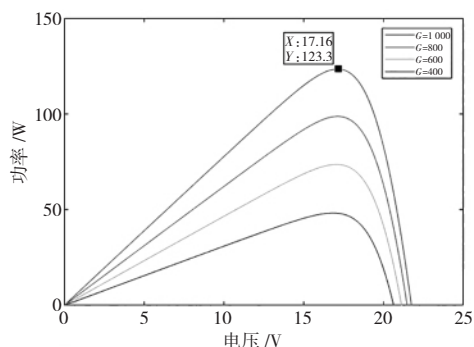


图5 基于变化辐射和固定温度的V&P特性曲线

阳能电池的短路电流。

从图5可以看出不同太阳辐射下输出电压与输出功率的关系,伴随着辐射量的降低,电流的见效输出功率的值也受到了影响,最大功率点随着太阳辐射强度的降低而减小。在仿真过程中,最大输出功率并不完全等于给定值,实验数据和给定数据之间会存在一些误差,这是因为输入值与理想参数不准确。

3.2 温度的变化

图6和图7显示了在固定太阳辐射1000 W/m²下V&I和V&P特性曲线随温度变化的性能。

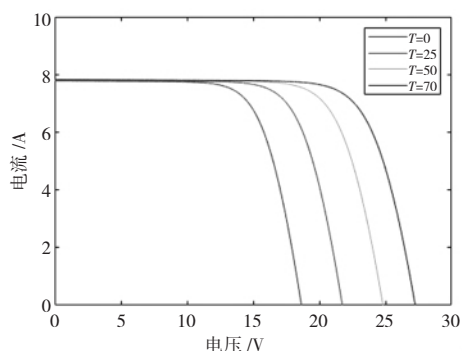


图6 基于温度变化和固定辐射的V&I特性曲线

通过改变太阳能电池的工作温度,也改变了开路电压和输出电压,温度越高导致电压越高,这是因为太阳能电池的二极管与温度成正比,上升的饱和电流限制了光伏系统输出电压,根据这条曲线,可以发现太阳能电池二极管在较高温度下的性能。另一方面,根据温度变化引起电压变化的理论,温度变化也会引起输出功率的变化,输出功率的变化如下页图7所示。

3.3 串联电阻的变化

考虑到串联电阻对输出电压和输出功率的影

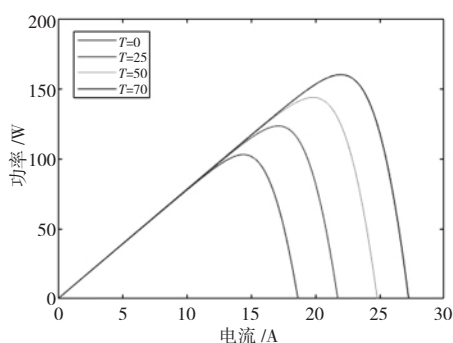


图 7 基于温度变化和固定辐射的 V&P 特性曲线

响,将串联电阻 R_s 的值从 0 逐步变化到 0.4,就可以得到变化曲线,如图 8 和图 9 所示。改变串联电阻 R_s 的值不会改变开路电压和电流,但会改变最大输出电压和电流。

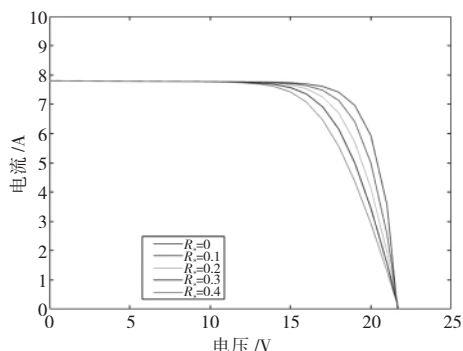


图 8 基于改变串联电阻的 V&I 特性曲线

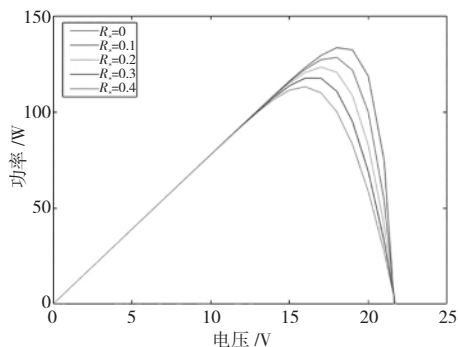


图 9 基于改变串联电阻的 V&P 特性曲线

从图 9 可以看出,通过改变串联电阻 R_s 的值来改变最大输出功率点,这是因为串联电阻的增加增加了太阳能电池本身的损耗,导致输出功率下降。

3.4 效率和填充因子

最后,标准条件(25℃和 AM1.5 1 000 W/m²)下

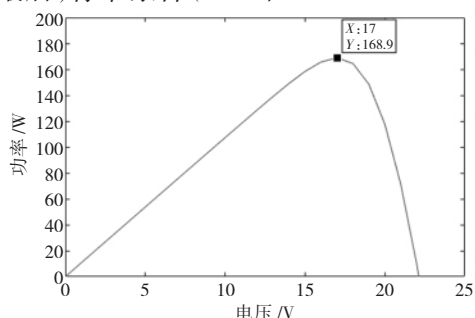


图 10 AM1.5 条件下单结太阳能电池的最大功率点

的最大功率点可以用公式(15)计算出来,

$$\text{效率 } \eta_1 = \frac{123.3}{36 \times 0.156 \text{ m} \times 0.156 \text{ m} \times \frac{1\,000 \text{ W}}{\text{m}^2}} \times 100\% = 14.04\%$$

从图 10 中,基于温度 25℃和 AM0 条件,最大功率点增加到 168.9W,那么 AM0 下的新效率可以计算为:

$$\eta_2 = \frac{168.9}{36 \times 0.156 \text{ m} \times 0.156 \text{ m} \times \frac{1\,350 \text{ W}}{\text{m}^2}} \times 100\% = 14.28\%$$

与之前的效率相比,新的效率 η_2 比 η_1 高,但只有 0.2%左右。通过总结本实验中单结太阳能电池模拟的模型。在标准的理想环境下,单结太阳能电池的基本效率约为 14%~15%。

根据最大输出功率和前面的参数,可以计算出单结太阳能电池的填充因子:

$$F = \frac{P_{\text{mp}}}{V_{\text{oc}} I_{\text{sc}}} = \frac{U_{\text{m}} I_{\text{m}}}{V_{\text{oc}} I_{\text{oc}}} = \frac{17 \times 7.252}{21.5 \times 7.80} \times 100\% = 73.524\%.$$

4 讨论

从上述文章看,单结太阳能电池的效率为 14.08%,显然,这个效率值不是最好的,而是基于从制造数据表中收集的参数。基本上,额定峰值功率 P_{max} 为 125 W,在本实践中,峰值功率达到 123.3 W,实验模型效率的误差是由于增加了分流电阻 R_{sh} 。移除分流电阻 R_{sh} 后,进行第二次模拟。目前,在标准条件温度 25℃和光照辐射 1 000 W/m² 下,输出功率达到 124.9 W。结果与制造商提供的最大功率几乎相同。另一方面,降低串联电阻 R_s 和二极管理想因子 A ,也可以提高输出功率,这意味着单结太阳能电池的效率在未来还有更好的发展空间。

5 结语

通过对单结太阳能电池进行建模和仿真,深入了解单结太阳能电池的结构和理论,每个变量的变化都会导致光伏系统最终输出的较大变化。随着越来越多的太阳能电池技术日趋成熟,以及光电转换效率的不断提高和制造成本的不断降低,光伏技术在太空和地面上的应用必然会越来越广泛。

参考文献

- [1] H. Bellia, R. Youcef, and M. Fatima. A detailed modelling of photovoltaic module using MATLAB[J]. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, 2019(1): 53-61.
- [2] G. Bhuvaneswari and R. Annamalai. Development of a solar cell model in MATLAB for PV based generation system[C]. in 2011 Annual IEEE India Conference, 2011: 1-5.
- [3] A. B. Hussain, A. S. Abdalla, A. S. Mukhtar, M. Elamin, R. Alam-mari, and A. Iqbal. Modelling and simulation of single- and

- triple-junction solar cells using MATLAB/SIMULINK[J]. International Journal of Ambient Energy, 2016(6):613-621.
- [4] M. A. Islam, A. Merabet, R. Beguenane, and H. Ibrahim, "Modeling solar photovoltaic cell and simulated performance analysis of a 250W PV module" [C]. in 2013 IEEE Electrical Power & Energy Conference, 2013:1-6.
- [5] M. Catelani, L. Ciani, M. K. Kazimierczuk, and A. Reatti. Matlab PV solar concentrator performance prediction based on triple junction solar cell model[J]. Measurement, 2016(5): 310-317.

(编辑:刘楠)

MATLAB-based Modeling of Single-Junction Solar Cells

Cao Ke

(Jinneng Holding Power Group Didian Liulin Branch, Liulin Shanxi 033399)

Abstract: By modeling and simulating single-junction solar cells in MATLAB/SIMULINK, the relationship between variable parameters and PV system output is found. The variable parameters can be series resistance, solar radiation intensity and operating ambient temperature. When one of them changes, the single-junction solar output voltage, output power, open-circuit voltage and short-circuit current also change in different magnitudes. The simulation results yield characteristic curves based on the different variables.

Key words: single junction solar cell; MATLAB; ideal electronics

(上接第8页)

争力。强化节能环保服务对全市能化产业绿色发展的支撑作用,推进合同能源管理、节能诊断、节能评估、节能技术改造咨询服务、节能环保融资、环境综合治理托管服务等模式,积极应对碳达峰、碳中和的压力。

3.7 强化要素协同,确保全市制造业企业降本增效

针对全市制造业生产效率不高、运营困难等问题,必须加强要素协同,提高制造业与现代金融、人力资源、物流等要素之间的协同性,增强制造业发展活力。要充分发挥晋中区位优势 and 物流基地,大

力发展现代物流服务体系,推动实现采购、生产、流动等上下游环节互联互通,提高生产制造和物流一体化运作水平。依托山西大学城等高校优势,大力发展职业教育,为全市制造业发展输送高素质劳动者。抓住“两化融合”的机遇,利用信息技术服务、工业软件、工业互联网等新技术,提升全市制造业发展模式,提高制造业生产效率。要充分利用多元化金融工具,为制造业发展提供更有效率的金融服务。

(编辑:郭萍茹)

Study on the Reconstruction of Manufacturing Competitive Advantages in Old Industrial Cities in Shanxi Province

—Taking Jinzhong City as an Example

Zhang Huani

(Shanxi Provincial Investment Consulting and Development Planning Institute, Taiyuan Shanxi 030002)

Abstract: By selecting Deyang City of Sichuan Province and Xianyang City of Shaanxi Province as typical research objects, we analyze the path of promoting the transformation and upgrading of manufacturing industry, summarize and refine the main experiences and practices, and further clarify the path of reconstructing the competitive advantage of manufacturing industry in Jinzhong City by combining the current situation of manufacturing industry development in Jinzhong City.

Key words: old industrial city; manufacturing industry; reconstruction of competitive advantage; path research